

## BAB II

### ***BATTERY CAPACITY TEST***

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Untuk membantu pembuatan proyek akhir ini, dibutuhkan beberapa referensi yang dapat dijadikan acuan dalam melakukan penelitian :

**Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan**

| No | Penulisan & Tahun | Judul Penelitian                                                                                                     | Masalah Penelitian                                                                       | Metode Penelitian                                                                    | Hasil Penelitian                                                                    | GAP Penelitian                                                        |
|----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1  | Ihsan, 2022       | Analisis dan Efisiensi Kebutuhan Kapasitas Baterai 110 V DC Gas Insulated Switchgear (GIS) 150 kV Wonokromo Surabaya | Penurunan kapasitas dan efisiensi baterai yang berpotensi mengganggu keandalan sistem DC | Pengujian kapasitas dan efisiensi baterai berdasarkan standar SKDIR 05202.K/DIR/2014 | Baterai hanya memiliki kapasitas 83 Ah dan efisiensi 26% sehingga tidak layak pakai | Belum membahas strategi optimalisasi atau perbaikan kapasitas baterai |
| 2  | Prasetyo, 2024    | Analysis of 110 V DC Battery Equalizing Test at 150 kV Kalibakal Substation PLN Purwokerto                           | Evaluasi kondisi baterai setelah <i>equalizing charge</i>                                | Pengujian <i>equalizing charge</i> dan discharge baterai                             | Tegangan sel stabil dan baterai normal                                              | Belum mengevaluasi kapasitas aktual terhadap beban jangka panjang     |
| 3  | Gunawan, 2025     | Optimalisasi Pemeliharaan Sistem Baterai 110 V DC di Gardu Induk Cilegon Lama                                        | Ketidakseimbangan kondisi sel baterai                                                    | Evaluasi tegangan per sel baterai HBL 300P                                           | Tegangan rata-rata sel normal namun ada sel lemah                                   | Belum mengkaji pengaruh sel lemah terhadap kapasitas total            |
| 4  | Sidabutar, 2025   | Optimalisasi Kapasitas Baterai 110 V DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan                                                 | Degradasi kapasitas baterai                                                              | Analisis kinerja baterai dan proses charging–discharging                             | Degradasi kapasitas signifikan dari nilai nominal                                   | Belum dilakukan pengujian pembebanan aktual detail                    |

| No | Penulisan & Tahun  | Judul Penelitian                                                                   | Masalah Penelitian                                   | Metode Penelitian                             | Hasil Penelitian                          | GAP Penelitian                         |
|----|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| 5  | Simanjuntak , 2021 | Performance Analysis of VRLA Battery for DC Load at Telecommunication Base Station | Performa baterai VRLA tidak sesuai sebagai backup DC | Pengujian kapasitas dan performa baterai VRLA | Hanya dua dari empat baterai layak backup | Belum spesifik pada sistem gardu induk |

Berdasarkan lima penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penurunan kapasitas dan efisiensi baterai merupakan masalah utama dalam sistem catu daya DC. Penelitian Ihsan dan Sidabutar menunjukkan bahwa tanpa pemeliharaan yang optimal, baterai dapat mengalami penurunan kinerja hingga tidak memenuhi standar operasional. Sebaliknya, penelitian Prasetyo membuktikan bahwa penerapan metode pemeliharaan seperti *equalizing charge* dapat memperbaiki keseragaman tegangan sel dan menjaga performa baterai.

Hasil Gunawan memperlihatkan bahwa meskipun kondisi umum baterai masih baik, adanya beberapa sel pada batas toleransi dapat menjadi indikasi awal terjadinya penurunan. Penelitian Simanjuntak menunjukkan bahwa ketidaksamaan performa antar unit baterai dapat terjadi dalam satu sistem, sehingga evaluasi tidak cukup dilakukan secara keseluruhan, tetapi harus mencakup pemeriksaan tiap unit atau sel.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian terdahulu menegaskan pentingnya pengujian kapasitas, efisiensi, dan distribusi tegangan sel secara berkala, serta penerapan strategi pemeliharaan yang tepat. Hasil-hasil tersebut menjadi dasar teori dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kondisi aktual baterai, membandingkan dengan standar yang berlaku, dan merumuskan rekomendasi pemeliharaan yang lebih optimal sesuai kebutuhan sistem tenaga listrik.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Sistem Baterai DC

#### 2.2.1.1 Definisi Sistem Baterai DC

Sistem baterai DC merupakan bagian penting dari *substation DC power supply system* yang menyediakan kehandalannya daya cadangan arus searah (*Direct Current*) untuk menjaga operasi peralatan proteksi, kontrol, dan sistem bantu lainnya saat terjadi gangguan suplai listrik utama. Dalam pengoperasian tenaga listrik terdapat dua macam sumber tenaga untuk kontrol di dalam Gardu Induk, ialah sumber arus searah (DC) dan sumber arus bolak balik (AC) [1].

Sumber daya DC (*Direct Current*) pada suatu gardu induk memiliki peran sangat penting dalam kelancaran operasi gardu itu sendiri dalam melayani kebutuhan listrik bagi para konsumen. Tegangan DC (*Direct Current*) itu arus yang mengalir dalam arah yang tetap (konstan) dimana masing-masing terminal selalu tetap polaritasnya. Sumber daya DC (*Direct Current*) pada gardu induk biasanya disuplai dari beberapa baterai yang disusun secara seri. Baterai ini berfungsi untuk memberikan daya DC (*Direct Current*) bagi rele, motor penggerak pada PMS (sakelar pemisah) dan PMT (sakelar pemutus tenaga), serta untuk mensuplai daya yang digunakan untuk peralatan telekomunikasi. DC *Power* merupakan perlengkapan bantu utama yang dibutuhkan sebagai suplai arus searah yang dimanfaatkan untuk berbagai peralatan. Dalam hal ini sistem baterai DC pada gardu induk dapat didefinisikan sebagai suatu sistem penyuplai daya searah yang mampu menyediakan arus tinggi [2].

Sistem DC (*Direct Current*) terdiri dari baterai dan *rectifier* yang berfungsi sebagai pengubah tegangan AC (*Alternating Current*) ke tegangan DC (*Direct Current*) menggunakan sumber AC (*Alternating Current*) sebagai input yang sangat rawan terhadap ancaman gangguan seperti kehilangan tegangan akibat sumber AC dari Trafo Pemakaian Sendiri GI padam akibat gangguan transmisi atau trafo daya atau tidak bekerjanya sistem Proteksi di GI akibat kegagalan Sistem DC. Oleh karena itu untuk mengurangi dampak kerugian yang diakibatkan gangguan tersebut dibutuhkan suatu sistem DC yang handal dan stabilitas yang tinggi dengan dilengkapi cadangan sumber tenaga yaitu baterai sebagai *back up* catu daya DC [3].

### 2.2.1.2 Fungsi Sistem Baterai 110 V dalam Operasi Proteksi dan Kontrol

Sistem baterai 110 V DC berperan sebagai sumber daya cadangan utama bagi rangkaian proteksi, kontrol, dan instrumentasi pada gardu induk sehingga memastikan kontinuitas operasi ketika suplai AC utama terganggu. Dalam kondisi gangguan, baterai menyediakan tegangan dan arus yang stabil kepada relai proteksi, *coil trip*, sistem SCADA atau PLC, alarm, dan peralatan kontrol lain sehingga urutan proteksi (*trip/close*) dapat berjalan tanpa hambatan dan mencegah akibat lebih luas seperti kerusakan peralatan atau pemadaman sistem [4].

Selain fungsi cadangan, baterai 110 V DC juga berperan dalam mendukung kestabilan sistem operasi harian: *rectifier* mengisi baterai pada mode *float* sehingga baterai selalu siap saat diperlukan, sementara sistem manajemen dan pemeliharaan (mis. *equalizing*, *capacity test*) menentukan kesiapan nyata bank baterai untuk memenuhi beban darurat. Pengukuran kapasitas nyata melalui pengujian seperti *battery capacity test* atau *charge–discharge test* merupakan indikator kunci untuk menilai *health/SOH (State-Of-Health)* dan kemampuan suplai beban selama durasi yang dibutuhkan [5].

Karena peran kritisnya, penurunan kapasitas baterai akibat penuaan, *over-loading*, atau praktik perawatan yang kurang dapat mengurangi margin (keamanan sistem) proteksi dan memperpendek waktu backup yang tersedia oleh karenanya pengujian berkala, pemantauan tegangan tiap sel, dan strategi pemeliharaan terencana (*rejuvenasi* atau pemeliharaan sel, *balancing*, penggantian sel lemah) adalah tindakan yang esensial untuk menjaga keandalan operasi proteksi dan kontrol. Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem baterai 110 V DC merupakan komponen vital dalam menjamin keandalan operasi proteksi dan kontrol pada gardu induk, khususnya dalam menghadapi kondisi gangguan atau kehilangan suplai AC utama. Keberlangsungan fungsi relai proteksi, sistem kontrol, dan instrumentasi sangat bergantung pada kemampuan baterai dalam menyediakan daya DC yang stabil dan memadai selama periode darurat [6].

Oleh karena itu, penurunan kapasitas baterai akibat faktor usia, beban, dan kurangnya pemeliharaan dapat berdampak langsung terhadap keselamatan dan kontinuitas sistem tenaga listrik. Kondisi ini menegaskan pentingnya pelaksanaan pengujian kapasitas baterai secara berkala, seperti *Battery Capacity Test (BCT)*, sebagai langkah evaluatif untuk memastikan baterai 110 V DC tetap memenuhi standar operasional dan mampu mendukung kinerja sistem proteksi dan kontrol secara optimal.

### 2.2.1.3 Komponen Utama Sistem Baterai DC

Sistem baterai DC pada gardu induk terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk menjamin keandalan suplai daya arus searah bagi sistem proteksi dan kontrol. Komponen utama tersebut meliputi *battery bank*, *charger/rectifier*, panel distribusi DC, serta sistem pemantauan baterai. *Battery bank* berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang tersusun dari sel-sel baterai yang dihubungkan secara seri dan/atau paralel untuk mencapai tegangan nominal sistem, seperti 110 V DC. Kondisi *battery bank* sangat menentukan kemampuan sistem DC dalam menopang beban proteksi dan kontrol selama gangguan suplai AC utama [4].

*Charger* atau *rectifier* merupakan komponen yang berfungsi mengubah tegangan AC menjadi DC serta menjaga baterai dalam kondisi siap pakai melalui mode pengisian *float* dan *equalizing*. *Rectifier* juga berperan menyuplai beban DC secara langsung pada kondisi normal sekaligus mengisi baterai. Keandalan *charger* sangat penting karena kegagalan sistem pengisian dapat mempercepat degradasi kapasitas baterai dan menurunkan keandalan sistem proteksi [7]. Panel distribusi DC berfungsi sebagai media penyaluran daya dari baterai dan *rectifier* menuju beban-beban DC, seperti relai proteksi, sistem kontrol, dan peralatan instrumentasi. Panel ini dilengkapi dengan pengaman berupa *circuit breaker* atau sekering untuk memastikan selektivitas dan keamanan sistem. Desain panel distribusi yang baik akan mencegah kegagalan satu rangkaian menyebabkan terhentinya suplai DC secara keseluruhan.

Selain itu, sistem baterai DC modern umumnya dilengkapi dengan *Battery Monitoring System* (BMS) atau sistem pemantauan daring yang berfungsi memantau parameter penting seperti tegangan sel, arus, suhu, dan kondisi kesehatan baterai (*State Of Health*). Penerapan sistem monitoring berbasis IoT terbukti mampu meningkatkan efektivitas pemeliharaan dan mendeteksi degradasi baterai lebih dini. Komponen pendukung lainnya meliputi sistem ventilasi, proteksi termal, serta perangkat pengujian seperti *load bank* yang digunakan dalam pelaksanaan *Battery Capacity Test* (BCT). Penggunaan *load bank* memungkinkan simulasi beban nyata sehingga kapasitas aktual baterai dapat diukur secara akurat dan dibandingkan dengan nilai nominalnya. Praktik ini direkomendasikan sebagai bagian dari manajemen baterai DC yang andal dan berkelanjutan [8].

#### **2.2.1.4 Instalasi Sistem DC (*Direct Current*)**

Instalasi sistem DC pada suatu gardu induk berfungsi sebagai sumber catu daya arus searah yang digunakan untuk menjamin keandalan pengoperasian peralatan proteksi, pengendalian, pengukuran, serta sistem komunikasi. Suplai DC ini umumnya dipasok oleh *rectifier* atau *charger*, baik satu fasa maupun tiga fasa, yang terhubung dengan satu atau dua set baterai berbagai sumber cadangan apabila suplai AC mengalami gangguan. Berdasarkan tingkat tegangan dan peruntukannya, sistem instalasi DC pada gardu induk dapat diklasifikasi menjadi tiga jenis utama, yaitu sebagai berikut:

##### **1. Instalasi Sistem DC 250 Volt**

Instalasi sistem DC 250 Volt digunakan untuk menyalurkan suplai tegangan DC sebesar 250 Volt yang dipasok dari *rectifier* atau *charger* tiga fasa dan terhubung dengan baterai. Sistem ini digunakan untuk menunjang pengoperasian peralatan utama pada gardu induk, antara lain :

- a. Motor – motor penggerak pada peralatan pemutus tenaga (PMT) dan pemisah (PMS)
- b. Peralatan relay proteksi
- c. Instrumen pengukuran dan pengendalian
- d. Rangkaian *Tripping* dan *Closing coil* pada PMT

## 2. Instalasi Sistem DC 110 Volt

Instalasi sistem DC 110 Volt berfungsi untuk menyalurkan suplai tegangan DC sebesar 110 Volt yang berasal dari *rectifier* atau *charger* dan dihubungkan dengan baterai. Sistem ini digunakan untuk mendukung pengoperasian berbagai peralatan control dan proteksi pada gardu induk meliputi :

- a. Motor penggerakan (PMT dan PMS)
- b. Relay proteksi serta meter digital
- c. Sistem sinyal, alarm dan indikasi
- d. Rangkaian *Tripping* dan *Closing coil*

## 3. Instalasi Sistem DC 48 Volt untuk komunikasi dan teleproteksi

Instalasi sistem DC 48 Volt ini digunakan untuk menyalurkan suplai DC sebesar 48 Volt yang dipasok dari *rectifier* atau *charger* dan terhubung dengan baterai. Sistem ini secara khusus digunakan untuk menunjang peralatan komunikasi dan teleproteksi pada gardu induk seperti :

- a. Sistem SCADA atau Remote Terminal Unit (RTU)
- b. Peralatan unit teleproteksi
- c. Sistem Komunikasi, termasuk Power Line Communication (PLC)
- d. Sistem alarm, sinyal dan indikasi pendukung komunikasi

### 2.2.1.5 Karakteristik Tegangan dan Arus pada Sistem 110 V DC

Sistem 110 V DC pada gardu induk memiliki karakteristik tegangan dan arus yang dirancang untuk menjamin kestabilan suplai daya bagi peralatan proteksi dan kontrol. Tegangan nominal 110 V DC dipilih karena mampu menyediakan margin (keamanan sistem) yang cukup terhadap penurunan tegangan (*voltage drop*) selama kondisi beban darurat, sekaligus aman untuk pengoperasian peralatan kontrol dan relai proteksi. Dalam kondisi normal, tegangan sistem DC dipertahankan oleh *rectifier* pada mode *float charging*, sedangkan baterai berfungsi sebagai penyangga energi untuk menjaga kestabilan tegangan ketika terjadi fluktuasi atau gangguan pada suplai AC utama [4].

Karakteristik arus pada sistem 110 V DC sangat bergantung pada jenis dan jumlah beban DC yang terhubung, seperti relai proteksi, *trip coil*, *closing coil*, sistem SCADA, dan peralatan instrumentasi. Pada kondisi normal, arus yang mengalir relatif kecil dan stabil, namun pada kondisi gangguan dapat terjadi lonjakan arus sesaat (*transient current*), terutama saat pengoperasian *trip* dan *close* pemutus tenaga. Oleh karena itu, sistem baterai harus mampu menyediakan arus puncak dalam waktu singkat tanpa mengalami penurunan tegangan yang signifikan. Karakteristik tegangan sistem 110 V DC juga dipengaruhi oleh kondisi baterai, khususnya kapasitas dan resistansi internal. Penurunan kapasitas baterai akibat penuaan akan menyebabkan tegangan sistem lebih cepat turun selama proses *discharge*, sehingga berpotensi mengganggu kinerja peralatan proteksi [9]. Penelitian yang dilakukan oleh Simanjuntak, 2021 menunjukkan bahwa pengujian tegangan per sel dan respons arus selama pengosongan merupakan indikator penting dalam menilai kesiapan sistem DC dalam menghadapi kondisi darurat [8].

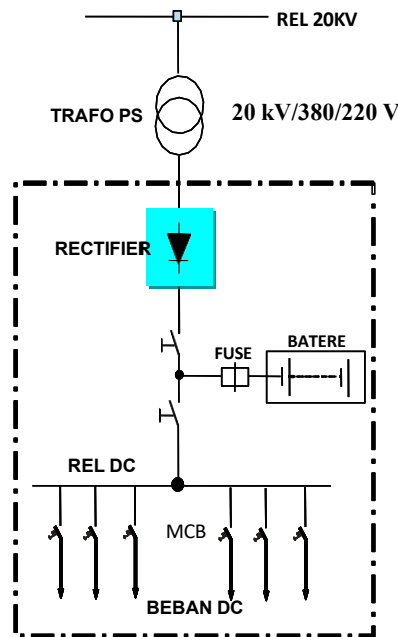
Dalam praktik operasional, standar pemeliharaan sistem DC menekankan bahwa variasi tegangan harus dijaga dalam batas toleransi tertentu agar sistem proteksi dan kontrol dapat bekerja secara andal. Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan kegagalan kerja relai atau *mal-operation*, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi berpotensi merusak peralatan elektronik. Pemantauan karakteristik tegangan dan arus secara berkala, termasuk melalui pengujian kapasitas baterai dan pengamatan profil *discharge*, menjadi bagian penting dari manajemen sistem 110 V DC [10].

#### **2.2.1.6 Bagian - Bagian Utama Peralatan Sistem DC (*Direct current*)**

Sistem DC pada gardu induk merupakan sistem penunjang yang sangat vital karena berfungsi sebagai sumber catu daya untuk peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi. Keandalan sistem ini ditentukan oleh integritas dan kinerja masing-masing komponen utama yang tersusun dalam satu kesatuan sistem.



Adapun bagian utama dari peralatan sistem DC (*Direct current*) antara lain :



**Gambar 2.1** Single Line Diagram Baterai

Komponen Utama Sistem Instalasi DC pada Gardu Induk sistem instalasi DC pada gardu induk terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terhubung untuk menjamin kontinuitas dan keandalan suplai daya arus searah. Komponen-komponen tersebut meliputi *rectifier* atau *charger*, baterai, konduktor dan terminal distribusi, yang masing-masing memiliki fungsi sebagai berikut :

1. *Rectifier* atau *Charger*

*Rectifier* atau *Charger* merupakan peralatan listrik yang berfungsi mengubah arus listrik bolak-balik (*Alternating Current/AC*) menjadi arus searah (*Direct Current/DC*). Pada sistem DC gardu induk, *Rectifier* umumnya digunakan untuk menyuplai daya DC ke beban secara normal sekaligus mengisi baterai. Selain itu *rectifier* menjaga kondisi baterai tetap pada tingkat pengisian yang optimal melalui mode pengisian *floating*, sehingga baterai selalu siap beroperasi saat terjadi gangguan pada sumber utama.

## 2. Baterai

Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik arus searah (DC) yang digunakan sebagai sumber daya cadangan. Pada kondisi kehilangan suplai AC atau kegagalan rectifier, baterai secara otomatis akan menyuplai daya keseluruhan beban sistem DC jika terjadi gangguan atau kehilangan suplai dari sumber utama. Dengan demikian, operasi peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi pada gardu induk untuk tetap dapat berlangsung tanpa gangguan.

## 3. Konduktor

Konduktor berfungsi sebagai media penghantar energi listrik arus searah (DC) yang menyalurkan daya dari sumber, yaitu *rectifier* atau baterai menuju ke beban. Pemilihan jenis dan ukuran konduktor harus disesuaikan dengan kapasitas arus, tegangan sistem, serta standar keselamatan dan keandalan yang berlaku pada instalasi gardu induk. Konduktor yang tidak sesuai dapat menurunkan efisiensi sistem dan mempengaruhi keandalan suplai DC.

## 4. Terminal – terminal

Terminal merupakan titik sambung dan titik distribusi pada sistem DC yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke berbagai kelompok beban. Keberadaan terminal ini memungkinkan pembagian suplai DC secara terstruktur, aman dan sistematis. Selain itu, terminal memudahkan proses pengoperasian, pengujian serta pemeliharaan sistem DC di gardu induk.

Berdasarkan konfigurasi sistem DC yang ditunjukkan pada diagram satu garis, dapat disimpulkan bahwa kelangsungan suplai daya DC sangat bergantung pada koordinasi kerja antara rectifier dan baterai. Rectifier berfungsi sebagai sumber utama dalam kondisi normal, sementara baterai berperan sebagai sumber cadangan saat terjadi gangguan. Konduktor dan terminal berperan penting dalam menjaga kualitas distribusi daya agar tetap stabil dan andal. Oleh karena itu, desain, pemasangan, dan pemeliharaan setiap komponen sistem DC harus dilakukan sesuai dengan standar teknis untuk memastikan sistem proteksi dan kontrol gardu induk dapat beroperasi secara optimal.

### 2.2.2 *Charger/Rectifier*

*Charger* sering juga disebut *Converter* adalah suatu rangkaian peralatan listrik yang digunakan untuk mengubah arus listrik bolak balik (*Alternating Current*, disingkat AC) menjadi arus listrik searah (*Direct Current*, disingkat DC), yang berfungsi untuk pasokan DC *power* baik ke peralatan-peralatan yang menggunakan sumber DC maupun untuk mengisi baterai agar kapasitasnya tetap terjaga penuh sehingga keandalan unit pembangkit tetap terjamin. Dalam hal ini baterai harus selalu tersambung ke *rectifier*.

Kapasitas *rectifier* harus disesuaikan dengan kapasitas baterai yang terpasang, setidaknya kapasitas arusnya harus mencukupi untuk pengisian baterai sesuai jenisnya. Jenis *charger* atau *rectifier* ada 2 (dua) macam sesuai sumber tegangannya yaitu *rectifier* 1 fasa dan *rectifier* 3 fasa.

1. *Rectifier* 1 (satu) Fasa

Yang dimaksud dengan *rectifier* 1 fasa adalah *rectifier* yang rangkaian inputnya menggunakan AC suplai 1 fasa. Melalui MCB sumber AC suplai 1 fasa 220 V masuk ke dalam sisi primer trafo utama 1 fasa kemudian dari sisi sekunder trafo tersebut keluar tegangan AC 110V, kemudian melalui rangkaian penyearah dengan *diode bridge* atau *thyristor bridge*. Tegangan AC tersebut diubah menjadi tegangan DC 110 V.

2. *Rectifier* 3 (tiga) Fasa

Yang dimaksud dengan *rectifier* 3 (tiga) fasa adalah *rectifier* yang rangkaian inputnya menggunakan AC suplai 3 fasa. Melalui MCB sumber AC suplai 3 fasa 380 V masuk ke dalam sisi primer trafo utama 3 fasa kemudian dari sisi sekunder trafo tersebut keluar tegangan AC 110 V per fasa kemudian melalui rangkaian penyearah dengan *diode bridge* atau *thyristor bridge*, arus AC tersebut dirubah menjadi arus DC 110 V yang masih mengandung *ripple* lebih rendah dibanding dengan *ripple rectifier* 1 fasa akan tetapi masih diperlukan juga rangkaian *filter* untuk lebih memperkecil *ripple* tegangan input.

Sumber tegangan arus bolak-balik (AC), baik satu fasa maupun tiga fasa, disalurkan melalui terminal input transformator *step-down* untuk menurunkan tegangan dari 380 V/220 V menjadi tegangan operasi sistem DC sebesar 110 V. Tegangan AC hasil penurunan tersebut kemudian disearahkan oleh rangkaian penyearah yang menggunakan dioda atau thyristor sehingga dihasilkan tegangan arus searah (DC) [11].

Proses penyearahan tidak menghasilkan tegangan DC yang benar-benar rata, melainkan masih mengandung ripple atau gelombang sisa akibat karakteristik penyearahan. Besarnya jumlah ripple bergantung pada jenis penyearah, konfigurasi fasa, serta kondisi beban. Untuk meningkatkan kualitas tegangan DC, digunakan rangkaian penyaring (*filter*) yang dipasang sebelum terminal output *rectifier*. Rangkaian filter ini berfungsi untuk meredam atau mengurangi ripple sehingga tegangan DC yang dihasilkan lebih stabil dan sesuai dengan kebutuhan sistem DC.

Kualitas tegangan DC yang baik sangat penting untuk memastikan dan menjamin keandalan peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi di gardu induk. *Ripple* yang berlebihan atau terlalu besar dapat mempengaruhi kinerja peralatan elektronik dan mempercepat degradasi baterai. Oleh karena itu, keberadaan dan kinerja rangkaian penyearah dan filter menjadi bagian penting dalam menjaga stabilitas dan kontinuitas suplai daya pada sistem DC.

### **2.2.3 Baterai**

Baterai atau *akumulator* adalah sebuah sel listrik dimana didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang *reversible* (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia *reversible* adalah didalam baterai dapat berlangsung proses pengubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia (proses pengisian), pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai, yaitu dengan melewati arus listrik dalam arah (polaritas) yang berlawanan di dalam sel. Jenis Sel baterai ini juga disebut “*Storage Battery*”, adalah suatu baterai yang mana dapat digunakan berulang kali pada keadaan sumber listrik arus bolak balik (AC) terganggu.

### 2.2.3.1 Jenis Baterai sistem DC

Baterai yang digunakan pada sistem DC stasioner, khususnya pada gardu induk dan instalasi sistem proteksi serta kontrol, harus memiliki tingkat keandalan tinggi, umur pakai panjang, serta kemampuan menyuplai arus dalam kondisi darurat. Oleh karena itu, pemilihan jenis baterai menjadi faktor penting dalam perancangan dan pengoperasian sistem DC 110 V. Secara umum, jenis baterai yang banyak digunakan pada sistem DC stasioner meliputi baterai *lead-acid*, baterai *nickel-cadmium* (Ni-Cd), dan dalam beberapa aplikasi tertentu baterai lithium ion sebagai alternatif teknologi baru.

#### 1. Baterai *Lead-Acid*

Baterai *Lead-Acid* merupakan jenis baterai yang paling umum digunakan pada sistem DC stasioner di gardu induk, baik dalam bentuk *Flooded Lead-Acid* maupun *Valve-Regulated Lead-Acid* (VRLA). Baterai ini dipilih karena karakteristiknya yang stabil, biaya investasi relatif rendah, serta kemampuannya menyediakan arus besar dalam waktu singkat yang dibutuhkan oleh sistem proteksi dan kontrol. Penelitian menunjukkan bahwa baterai *lead-acid* masih menjadi pilihan utama untuk sistem DC gardu induk karena kemudahan pemeliharaan dan kesesuaiannya dengan standar operasional kelistrikan [4].

#### 2. Baterai *Nikel Cadmium*

Baterai *Nickel-Cadmium* (Ni-Cd) dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap suhu ekstrem, siklus *charge-discharge* yang tinggi, serta umur pakai yang relatif panjang dibandingkan baterai *lead-acid*. Oleh karena itu, baterai Ni-Cd sering digunakan pada sistem DC stasioner di lingkungan dengan kondisi operasi berat atau tingkat keandalan yang sangat tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa baterai Ni-Cd mampu mempertahankan tegangan yang lebih stabil selama proses discharge, sehingga cocok untuk aplikasi proteksi kritis [12].

### 3. Baterai *Lithium*

Baterai *Lithium-Ion* mulai dipertimbangkan sebagai alternatif pada sistem DC stasioner karena menawarkan kepadatan energi yang tinggi, efisiensi pengisian yang baik, serta ukuran atau dimensi yang lebih ringkas. Sehingga mampu meningkatkan efektivitas pemanfaatan ruang dan kesiapan suplai DC. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa baterai lithium-ion memiliki potensi untuk digunakan pada sistem DC gardu induk dengan dukungan *Battery Management System* (BMS) yang andal untuk menjamin keselamatan dan stabilitas operasional [13].

#### 2.2.3.2 Klasifikasi Baterai

Baterai merupakan perangkat elektrokimia yang bekerja dengan mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi oksidasi dan reduksi (*redox reaction*) yang berlangsung secara reversibel. Dalam sistem DC stasioner seperti pada gardu induk, baterai berfungsi menyimpan energi listrik saat proses pengisian (*charging*) dan melepaskannya kembali saat dibutuhkan pada proses pengosongan (*discharging*). Prinsip kerja ini memungkinkan baterai berperan sebagai sumber daya cadangan yang andal bagi sistem proteksi dan kontrol ketika suplai utama dari sistem AC tidak tersedia. Proses *discharge* pada sel berlangsung apabila sel dihubungkan dengan beban maka, elektron mengalir dari anoda melalui beban ke katoda, kemudian ion-ion negatif mengalir ke anoda dan ion-ion positif mengalir ke katoda.

Prinsip kerja baterai pada sistem DC stasioner juga ditandai dengan karakteristik pelepasan arus yang relatif stabil dalam rentang tegangan tertentu hingga mencapai batas *Cut-Off Voltage*. Setelah melewati batas tersebut, tegangan baterai akan turun secara signifikan dan tidak lagi mampu menyuplai beban secara andal. Oleh karena itu, pemantauan tegangan, arus, dan durasi pengosongan menjadi parameter penting dalam menilai kemampuan kerja baterai, terutama melalui metode *Battery Capacity Test* (BCT) yang mensimulasikan kondisi beban nyata [8].

Dalam sistem baterai 110 V DC, beberapa sel baterai dihubungkan secara seri untuk mencapai tegangan nominal yang dibutuhkan, sedangkan konfigurasi paralel digunakan untuk meningkatkan kapasitas arus dan waktu suplai. Prinsip kerja rangkaian seri-paralel ini memungkinkan sistem baterai memenuhi kebutuhan daya jangka pendek dengan arus tinggi maupun kebutuhan suplai jangka panjang selama kondisi darurat. Stabilitas prinsip kerja tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi setiap sel baterai, sehingga degradasi satu sel dapat berdampak pada kinerja keseluruhan bank baterai [4].

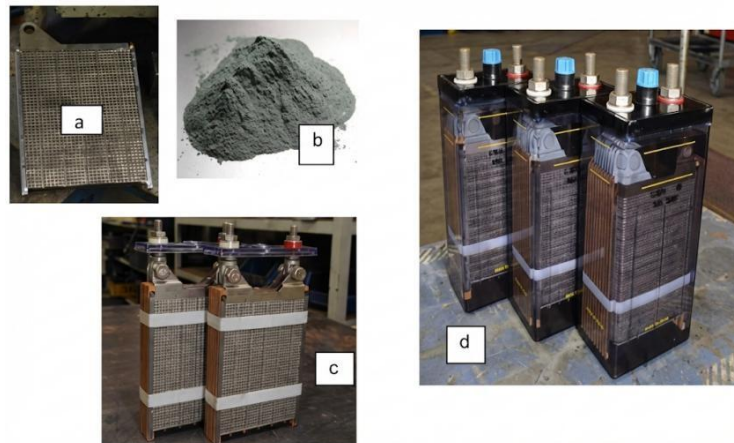
Dengan demikian, prinsip kerja baterai dalam sistem DC stasioner didasarkan pada proses elektrokimia yang memungkinkan penyimpanan dan pelepasan energi listrik secara terkendali. Keandalan suplai DC sangat bergantung pada kestabilan reaksi kimia, konfigurasi sel baterai, serta kemampuan baterai mempertahankan tegangan dan arus selama proses pengosongan. Pemahaman terhadap prinsip kerja baterai ini menjadi landasan penting dalam pelaksanaan pengujian kapasitas baterai, khususnya *Battery Capacity Test* (BCT), untuk memastikan bahwa sistem baterai 110 V DC mampu mendukung operasi proteksi dan kontrol secara optimal.

#### **2.2.3.3 Bagian Utama Baterai**

Baterai tersusun dari beberapa bagian utama yaitu :

1. Elektroda

Tiap sel baterai terdiri dari 2 (dua) elektroda, yaitu elektroda positif dan negatif, direndam dalam suatu larutan kimia yang berfungsi sebagai media perpindahan elektron pada saat berlangsung *charge discharge*. Elektroda positif dan negatif tersusun dari beberapa *Grid* yang berupa rangka besi atau fiber berfungsi sebagai tempat material aktif. Material aktif berfungsi sebagai material yang bereaksi secara kimia untuk menghasilkan energi listrik pada waktu pengosongan (*discharge*). Baterai elektroda dapat dilihat pada gambar 2.2<sup>[4]</sup>.



**Gambar 2.2** a) Plat Grid, b) Material Aktif, c) Grid Rangka Besi, d) Terakit  
Dalam *Plastic Container*

## 2. Elektrolit

Elektrolit adalah cairan atau larutan senyawa kimia yang berfungsi menghantarkan arus listrik, larutan tersebut dapat menghasilkan muatan listrik positif dan negatif. Bagian yang bermuatan positif disebut ion positif dan bagian yang bermuatan negatif disebut ion negatif. Makin banyak ion-ion yang dihasilkan suatu elektrolit maka makin besar daya hantar listriknya. Jenis cairan elektrolit baterai terdiri dari 2 (dua) macam, yaitu:

- a. Larutan Asam Belerang ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), digunakan pada baterai asam.
- b. Larutan Kalium Hidroksida ( $\text{KOH}$ ), digunakan pada baterai alkali.

Elektrolit memiliki peran krusial dalam proses elektrokimia baterai karena berfungsi sebagai media untuk transfer ion antara elektroda positif dan negatif. Keberlangsungan reaksi kimia di dalam sel baterai sangat bergantung pada kondisi elektrolit, termasuk komposisi kimia, konsentrasi, dan kemurniannya. Kinerja elektrolit yang optimal akan memastikan reaksi oksidasi dan reduksi berlangsung secara stabil sehingga arus listrik dapat dihasilkan secara kontinu. Pada baterai asam, elektrolit berupa larutan asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) yang berfungsi sebagai sumber ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) dan ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Konsentrasi elektrolit memengaruhi tegangan sel dan kapasitas baterai. Penurunan konsentrasi asam akibat proses pengosongan akan menyebabkan penurunan kemampuan baterai untuk menyuplai arus, sehingga pengukuran berat jenis elektrolit sering digunakan sebagai indikator kondisi pengisian dan kesehatan baterai [14].



Sementara itu, pada baterai alkali larutan Kalium Hidroksida (KOH) berfungsi sebagai medium untuk penghantar ion hidroksida ( $\text{OH}^-$ ). Jenis elektrolit ini bersifat stabil terhadap perubahan volume selama proses pengisian dan pengosongan, sehingga umur pakai baterai yang relatif lebih panjang. Namun, degradasi elektrolit akibat kontaminasi atau penguapan tetap dapat mengurangi efisiensi reaksi elektrokimia dan menyebabkan penurunan kapasitas baterai.

Oleh karena itu, kondisi elektrolit merupakan salah satu parameter penting dalam pemeliharaan baterai sistem DC. Penurunan kualitas elektrolit dapat menyebabkan peningkatan resistansi internal, penurunan tegangan terminal, dan penurunan keandalan suplai daya cadangan pada sistem peroteksi gardu induk. Oleh karena itu, pemantauan dan pemeliharaan elektrolit diperlukan untuk menjaga kinerja baterai sesuai dengan standar operasional.

### 3. Sel Baterai

Sel baterai dibagi dalam beberapa unit atau grup yang terdiri dari 2 sampai 10 sel per unit dan tergantung dari ukuran sel baterai tersebut. Baterai tidak boleh ditempatkan langsung di lantai sehingga memudahkan dalam melakukan pemeliharaan dan tidak terdapat kotoran dan debu diantara sel baterai. Baterai juga jangan ditempatkan pada lokasi yang mudah terjadi proses karat dan banyak mengandung gas, asap, polusi serta nyala api. Sel baterai berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan elektrolit dan elektroda.

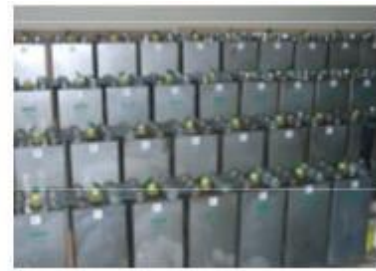
Instalasi baterai sesuai dengan penempatannya dibagi menjadi 2 (dua) macam bahan bejana (*container*) yaitu :

#### a. *Steel Container*

Sel baterai dengan bejana (*container*) terbuat dari baja (*steel*) ditempatkan dalam rak kayu dengan jarak isolasi secukupnya, hal ini untuk menghindari terjadi hubung singkat antar sel baterai dan hubung tanah serta memudahkan untuk melakukan pemeriksaan batas (*level*) tinggi permukaan elektrolit serta pemeliharaan baterai lainnya.

b. *Plastic Container*

Sel baterai dengan bejana (*container*) terbuat dari plastik ditempatkan dalam rak besi yang diisolasi, hal ini untuk menghindari terjadi hubung singkat antar sel baterai atau hubung tanah apabila terjadi kerusakan atau kebocoran elektrolit baterai. Sel baterai disusun memanjang satu baris atau lebih tergantung jumlah sel baterai dan kondisi ruangan. Sel baterai ditempatkan pada *stairs rack* sehingga memudahkan dalam melaksanakan pemeliharaan, pengukuran dan pemeriksaan level elektrolit. Agar ventilasi cukup dan memudahkan pemeliharaan maka harus ada ruang bebas pada rangkaian baterai sekurang kurangnya 25 cm antara unit atau grup baterai lainnya serta grup atau unit baterai paling atas. Instalasi baterai dan *charger* ditempatkan pada ruangan tertutup dan dipisahkan, hal dimaksudkan untuk memudahkan pemeliharaan dan perbaikan. Plastic dan Steel Container dapat dilihat pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** *Plastic Container dan Steel Container*

4. Ukuran Kabel Pada Instalasi Baterai

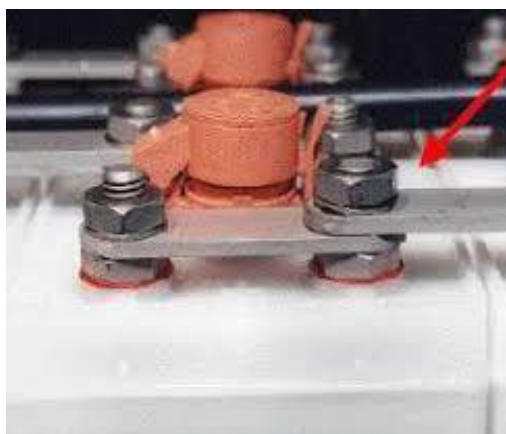
Bagian yang terpenting dalam pemasangan instalasi baterai adalah diperolehnya sambungan kabel yang sependek mungkin untuk mendapatkan rugi tegangan (*voltage drop*) sekecil mungkin. Ukuran kabel disesuaikan dengan besarnya arus yang mengalir. Ukuran kabel merupakan salah satu faktor penting dalam instalasi baterai karena berpengaruh langsung terhadap besarnya rugi tegangan dan keandalan sistem DC. Panjang kabel yang berlebihan akan meningkatkan nilai resistansi, sehingga menyebabkan penurunan tegangan pada sisi beban. Kondisi ini dapat mengurangi efektivitas suplai daya dari baterai, terutama saat sistem beroperasi dalam kondisi darurat.

Pemilihan ukuran penampang kabel harus disesuaikan dengan arus maksimum yang mengalir serta memperhitungkan kapasitas arus KHA (*ampacity*) kabel. Kabel dengan penampang yang tidak memadai dapat menyebabkan pemanasan berlebihan, meningkatkan kerugian daya, dan mempercepat degradasi isolasi. Sebaliknya, penggunaan kabel dengan ukuran yang sesuai akan menjaga stabilitas tegangan dan meningkatkan efisiensi penyaluran energi dari baterai ke peralatan sistem DC.

Selain itu, kualitas sambungan kabel juga berperan dalam mengurangi kerugian tegangan. Sambungan yang longgar atau tidak sempurna dapat menimbulkan tahanan kontak yang tinggi, sehingga meningkatkan kerugian dan berpotensi mengurangi keandalan sistem. Oleh karena itu perencanaan jalur kabel sependek mungkin serta pemilihan ukuran kabel yang sesuai menjadi bagian penting dalam memastikan kinerja optimal dan kontinuitas operasi sistem baterai.

## 5. Terminal dan Penghubung Baterai

Terminal dan klem pada sel baterai berfungsi untuk menghubungkan kutub-kutub sel baterai, menggunakan bahan *nickel plated steel* atau *cooper* sedangkan penghubung antar unit atau grup baterai menggunakan bahan *nickel plated* atau berupa kabel yang terisolasi (*Insulated Flexible Cable*). Khusus untuk kabel penghubung berisolasi, *drop voltage* maksimal harus sebesar 200 mV (Standar dari Alber Corp). Demikian pula kekerasan atau pengencangan baut penghubung harus sesuai dengan spesifikasi pabrik pembuat baterai. Hal ini untuk menghindari *loss contact* antara kutub baterai yang dapat menyebabkan terganggunya sistem pengisian baterai serta dapat menyebabkan terganggunya kinerja baterai. Terminal Penghubung Batei dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Terminal Penghubung Baterai

Berdasarkan **Gambar 2.4**, dapat dilihat bahwa terminal konektor atau penghubung baterai berfungsi sebagai titik sambung utama antara sel-sel baterai dalam rangkaian seri. Kualitas koneksi atau sambungan pada terminal ini sangat mempengaruhi kontinuitas aliran arus listrik serta kestabilan tegangan sistem DC. Sambungan yang baik ditandai dengan permukaan kontak yang bersih, rata, dan terpasang dengan tekanan mekanis yang sesuai.

Penggunaan material konduktif pada terminal dan klem bertujuan untuk meminimalkan tahanan kontak dan mencegah terjadinya korosi. Mengencangkan baut sesuai spesifikasi pabrikan memastikan tekanan kontak tetap optimal sehingga tidak menimbulkan pemanasan berlebihan atau *loss contact*. Apabila sambungan tidak terpasang dengan baik, dapat terjadi peningkatan kerugian tegangan yang berdampak pada terganggunya proses pengisian baterai serta menurunnya kinerja baterai saat menyuplai beban.

Dengan demikian, kondisi fisik terminal penghubung baterai perlu diperhatikan secara berkala melalui inspeksi visual dan pengukuran *voltage drop*. Pemeliharaan yang tepat pada terminal penghubung akan mendukung keandalan sistem baterai dan menjaga kelangsungan suplai daya pada sistem DC gardu induk.

#### **2.2.3.4 Ruang Baterai**

Pada pemasangan baterai di ruangan tertutup, maka diperlukan adanya sirkulasi udara yang cukup di ruang baterai tersebut. Selain dilengkapi dengan *exhaust fan* juga membutuhkan ventilasi udara masuk. Ventilasi udara masuk ini

harus di desain khusus (dilengkapi penyangring udara) agar ruang baterai tidak mudah kotor dan volume udara yang berputar cukup dengan tujuan membuang gas Hidrogen dan oksigen (eksplosif) yang timbul akibat proses kimia baterai. Untuk ventilasi atau volume udara yang mengalir adalah sebagai berikut :

$$Q = 55 \times n \times I \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

Q = Volume udara (Liter/Jam)

n = Jumlah Sel Baterai

I = Arus pengisian pada akhir pengisian atau dalam kondisi pengisian Floating (Ampere)

Bila baterai akan dilakukan pemeriksaan ataupun perawatan maka semua pintu jendela dan pintu harus dibuka agar udara lebih banyak yang masuk. Sesuai dengan Standar DIN 0510 maka n baterai untuk jenis baterai asam tidak boleh lebih dari 38°C dan untuk baterai alkali tidak boleh lebih dari 45°C. Ruang Baterai dapat dilihat pada gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Ruang Baterai

Ruangan baterai merupakan bagian penting dalam instalasi sistem baterai karena berfungsi untuk menjaga kondisi lingkungan agar proses elektrokimia di dalam baterai dapat berlangsung secara aman dan stabil. Selama proses pengisian, terutama pada tahap akhir pengisian dan kondisi *floating*, baterai dapat menghasilkan gas hidrogen dan oksigen yang mudah terbakar. Oleh karena itu, sistem ventilasi yang memadai diperlukan untuk mencegah penumpukan gas dan mengurangi risiko ledakan. Perhitungan volume udara yang diperlukan berdasarkan persamaan yang diberikan bertujuan untuk memastikan bahwa laju pertukaran udara dapat mengencerkan konsentrasi gas hingga berada di bawah batas aman. Parameter jumlah

sel baterai dan arus pengisian merupakan faktor penentu volume udara yang harus dialirkan, sehingga desain ventilasi harus disesuaikan dengan konfigurasi dan kapasitas sistem baterai yang terpasang. Penggunaan kipas *exhaust fan* yang didukung oleh ventilasi udara masuk yang difilter juga berperan dalam menjaga kebersihan ruangan dan mendukung sirkulasi udara yang efektif.

Selain ventilasi, pengendalian suhu ruangan baterai menjadi aspek penting dalam menjaga umur dan kinerja baterai. Suhu ruangan yang melebihi batas standar dapat mempercepat degradasi sel dan mengurangi keandalan sistem. Oleh karena itu, pembatasan suhu maksimum sesuai standar untuk baterai asam dan alkali harus dipenuhi. Selama inspeksi atau pemeliharaan, membuka pintu dan jendela direkomendasikan untuk meningkatkan pertukaran udara dan menciptakan kondisi kerja yang lebih aman. Dengan sistem ventilasi dan pengaturan suhu ruangan yang sesuai dengan standar, ruangan baterai dapat mendukung operasi sistem DC yang andal dan meminimalkan potensi gangguan maupun risiko keselamatan akibat gas yang dihasilkan oleh reaksi kimia baterai.

#### **2.2.4 Battery Charger**

*Battery charger* merupakan peralatan yang memiliki fungsi utama untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC dan mengisi muatan atau charging pada *battery cell*. Tegangan 3 fasa 380V disearahkan oleh *battery charger* menjadi tegangan 220V DC. Pada proses ini *battery charger* menggunakan *thyristor* yang dapat diatur sudut penyalanya. Komponen utama dari *battery charger* terdiri dari trafo daya, *thyristor*, dan filter L (induktor) C (kapasitor). Prinsip Kerja *Battery charger* merubah tegangan 3 fasa 380V 50Hz menjadi tegangan DC. Ketika *charger* 1 mati maka *charger* 2 menanggung semua beban yang ada. Begitupun sebaliknya ketika *charger* 2 mati maka *charger* 1 menanggung semua beban yang ada. Output dari *charger* di filter sehingga *ripple* tegangannya  $\pm 0.5\%$ . Komponen yang digunakan mengurangi *ripple* terdiri dari induktor dan kapasitor yang nilainya untuk mengurangi *ripple* sesuai dengan ketentuan.

#### 2.2.4.1 Pengisian Ulang Baterai Yang Beroperasi

Setelah terjadi pengosongan / pemakaian (*discharge*) baterai perlu pengisian kembali 4 Macam-macam pengisian ulang tersebut adalah :

##### 1. *Cycle Charging*

Pengisian dengan cara *cycle-charging* adalah mengisi (*charging*) kembali baterai setelah pengosongan (*discharge*) sebagian atau pengosongan secara normal. Untuk pengisian cara ini biasanya dibutuhkan waktu antara 5 sampai 10 jam. Jika pengisian sudah penuh kemudian pengisian dihentikan, umumnya secara otomatis. Cara *cycle-charging* umumnya banyak digunakan pada baterai diesel (*electric industrial truck service*).

##### 2. *Boost & Quick Charging*

Pengisian dengan cara *boost & quick charging* adalah untuk pengisian baterai yang dipakai di pabrik-pabrik, juga untuk baterai diesel (*industrial truck service*) dimana diperlukan tambahan pengisian dalam periode yang singkat misalnya pada jam-jam istirahat. Pengisian cara ini cukup untuk pelayanan satu hari. Arus yang diberikan ke baterai tidak boleh melebihi harga ampere-jamnya. Untuk menjaga pengisian yang berlebihan dan arus yang terlalu besar, biasanya alat pengisi ini mempunyai *automatic out-off* yang mana memberhentikan pengisian pada waktu baterai mencapai suhu tinggi.

##### 3. *Floating charging*

Pengisian dengan cara ini, dimana baterai secara terus-menerus tersambung pada rangkain luar (sumber AC), alat pengisi baterai (*battery charge*) dan beban. Alat pengisi baterai ini direncanakan untuk menjaga suatu tegangan konstan dari baterai yang tersambung ke beban. Biasanya tegangan yang diberikan untuk mengalirkan arus untuk mengatasi kerugian dalam baterai dan menjaga baterai selalu dalam keadaan pengisian penuh (*full-charge*) adalah tetap (*konstan*), untuk :

- a. Baterai timah hitam : 2,18Volt/sel
- b. Baterai alkali : 1,40-1,42 Volt/sel

Pengoperasian baterai secara pengisian terapung (*floating charging*) umumnya digunakan di gardu induk dan pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, dimana baterai dan alat pengisian baterai dihubungkan paralel dengan busbar umum dari supply arus searah (DC) [15].

#### 4. *Equalizing Charging*

Dalam sel-sel dari suatu baterai yang beroperasi dengan “*floating charging*” akan selalu terjadi sedikit perbedaan dalam kondisi kimia antara sel yang satu dengan sel lainnya. Hal ini akan mengakibatkan beberapa sel akan mencapai pengisian penuh dan berakibat menurunnya kapasitas baterai. Keadaan dimana terdapat perbedaan kondisi kimia ini disebut “*out off balance*”. Tujuan dari *equalizing charging* adalah untuk mengembalikan “*out of balance*” menjadi “*balance*” (seimbang) lagi, dimana setiap sel mempunyai harga yang mendekati sama, sehingga dapat menghindarkan pengggaraman belerang pada plat-plat aktifnya. *Equalizing Charge* dilaksanakan dengan cara menaikkan tegangan baterai sesuai dengan yang ditentukan dalam buku petunjuk masing- masing pabrik [16] [17].

Dalam sel-sel dari suatu baterai yang beroperasi dengan pengisian terapung (*floating charge*) akan selalu terjadi sedikit perbedaan (yang tidak dapat dihindarkan) dalam kondisi kimia (*chemical condition*) antara satu sel dengan sel yang lainnya.

Pengisian ini berlangsung sampai semua sel berhenti mengeluarkan gas (*gas freely*) dan pembacaan tegangan serta berat jenis elektrolitnya menunjukkan bahwa baterai telah diisi penuh (*full charge*) sesuai dengan harga yang ditentukan dalam petunjuk masing-masing pabrik. *Battery Charger* dapat dilihat pada gambar 2.6.





**Gambar 2.6** *Battery Charger*

**Gambar 2.6** menunjukkan peralatan *battery charger* yang berfungsi sebagai sumber utama pengisian dan pengatur tegangan dalam sistem baterai. Dalam kondisi operasi *floating*, *battery charger* menjaga tegangan keluaran yang stabil sehingga seluruh sel baterai berada pada kondisi siap pakai tanpa mengalami pengisian berlebih (*overcharge*). Perbedaan kondisi kimia antar sel yang tidak dapat dihindari akan dikompensasi melalui pengaturan tegangan pengisian yang konstan [18].

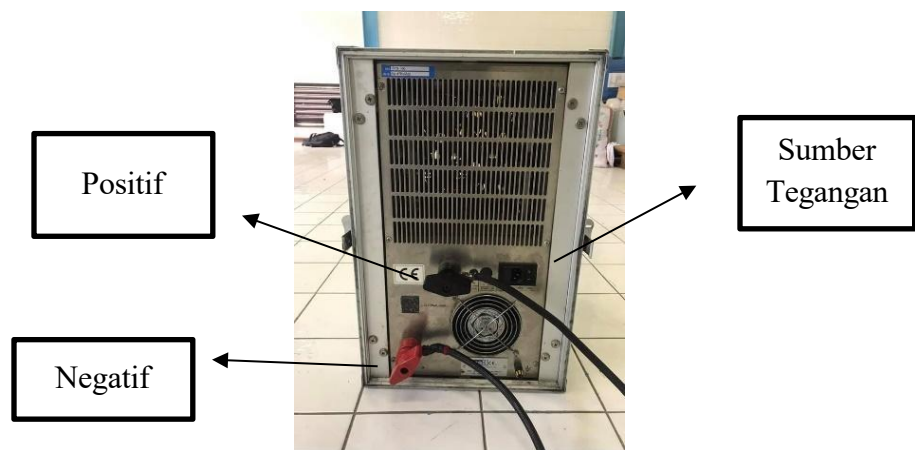
Proses pengisian berlangsung hingga parameter tegangan dan berat jenis elektrolit mencapai nilai yang ditentukan oleh pabrikan sebagai indikator *full charge*. Pada tahap ini, terbentuk gas dalam jumlah kecil sebagai akibat reaksi elektrokimia normal, yang menandakan bahwa baterai telah mencapai kondisi pengisian maksimum. Oleh karena itu, *battery charger* harus mampu mengontrol arus dan tegangan secara presisi untuk menjaga keseragaman kondisi antar sel. Dengan pengoperasian *Battery Charger* yang andal, sistem baterai dapat mempertahankan kapasitas dan umur pakainya, serta menjamin kontinuitas suplai daya DC untuk peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi pada gardu induk.

### 2.2.5 Alat uji BCT

Alat uji kapasitas dan Laptop ialah alat yang digunakan untuk melakukan pengujian kapasitas baterai tahunan. Untuk baterai menggunakan alat uji kapasitas bermerek ISA tipe BTS/100.



**Gambar 2.7** Alat Uji Kapasitas BCT Tampak Depan



**Gambar 2.8** Alat Uji Kapasitas BCT Tampak Belakang

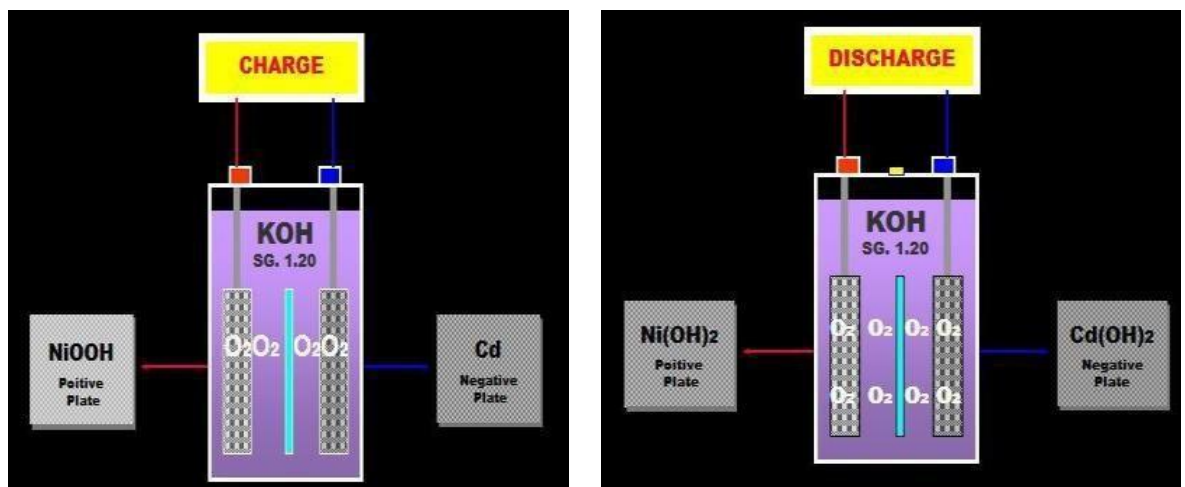
Berdasarkan **Gambar 2.7 dan 2.8**, alat uji kapasitas baterai berfungsi sebagai perangkat utama dalam pelaksanaan pengujian kapasitas baterai secara berkala. Perangkat ini bekerja dengan memberikan beban terkontrol pada baterai sehingga dapat diketahui kemampuan aktual baterai dalam menyuplai arus selama periode waktu tertentu. Hasil pengujian tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat degradasi kapasitas baterai dibandingkan dengan kapasitas nominal yang dirancang [19].

Penggunaan alat uji kapasitas bermerek ISA tipe BTS/100 memungkinkan pengukuran parameter baterai seperti tegangan, arus, dan durasi pengosongan secara akurat. Selama pengujian berlangsung, perangkat laptop berperan sebagai media antarmuka untuk pengaturan parameter pengujian, pemantauan kondisi baterai secara real-time, serta pencatat hasil pengujian. Data yang diperoleh dapat dianalisis untuk menentukan kelayakan baterai dalam mendukung sistem DC.

Dengan pelaksanaan pengujian kapasitas secara terencana dan didokumentasikan, kondisi baterai dapat dipantau secara objektif. Hal ini mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*), sehingga potensi kegagalan baterai dapat dideteksi lebih awal dan keandalan sistem DC gardu induk tetap terjaga [20].

### 2.2.6 Prinsip Kerja Baterai

Gambar berikut menunjukkan susunan dasar sebuah baterai:



**Gambar 2.9** (a)Proses Pengisian (b)Proses Pengosongan

**Gambar 2.9** menunjukkan susunan dasar sebuah sel baterai, yang terdiri dari elektroda positif, elektroda negatif, dan elektrolit sebagai media reaksi elektrokimia. Perbedaan potensial antara elektroda positif dan elektroda negatif menyebabkan terjadinya aliran arus listrik ketika rangkaian ditutup melalui saklar. Elektrolit berperan sebagai konduktor ion yang memungkinkan terjadinya reaksi kimia, sehingga energi kimia di dalam baterai dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Prinsip Kerja Baterai :

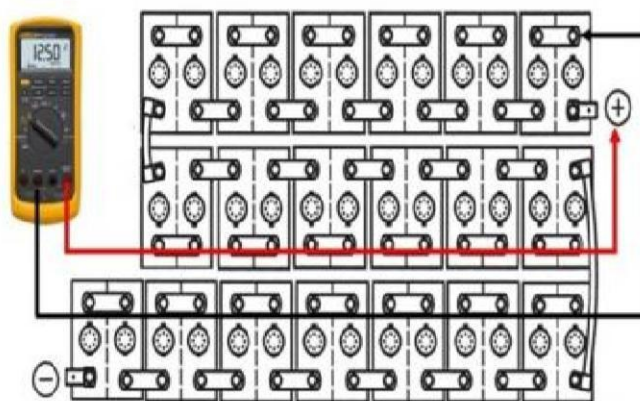
a) Dalam proses pengisian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (a) di bawah ini, ketika sel dihubungkan ke sumber daya, elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda, dan proses kimia yang terjadi adalah sebagai berikut:

- Aliran elektron terbalik, mengalir dari anoda melalui sumber daya ke katoda.
- Ion negatif mengalir dari katoda ke anoda.
- Ion positif mengalir dari anoda ke katoda. Oleh karena itu, respons kimia selama pengisian berlawanan dengan yang terjadi selama pengosongan.

b) Proses Pengosongan

Proses pengosongan dalam sel baterai terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (b). Ketika sel dihubungkan ke beban, elektron mengalir dari elektroda negatif (anoda) melalui sirkuit eksternal ke elektroda positif (katoda). Pada saat yang sama, ion negatif bergerak menuju anoda dan ion positif bergerak menuju katoda melalui elektrolit. Aliran elektron dan ion ini memicu reaksi elektrokimia yang menghasilkan energi listrik untuk memasok beban.

Kinerja sel baterai sangat dipengaruhi oleh kondisi masing-masing komponen ini. Ketidakseimbangan dalam reaksi kimia, degradasi elektroda, atau penurunan kualitas elektrolit dapat menyebabkan penurunan tegangan dan kapasitas sel. Oleh karena itu, pemahaman tentang struktur dasar sel baterai penting sebagai dasar untuk menganalisis kinerja baterai dalam sistem DC.



**Gambar 2.10** Model Susunan Baterai Di Pasang Seri

**Gambar 2.10** menunjukkan konfigurasi model penyusunan baterai secara seri, di mana kutub positif dari satu sel dihubungkan ke kutub negatif sel berikutnya. Pada susunan seri, tegangan total baterai merupakan hasil penjumlahan tegangan masing-masing sel, sementara arus yang mengalir dalam rangkaian sama pada setiap sel. Konfigurasi ini umumnya digunakan pada sistem DC gardu induk untuk memperoleh tegangan kerja yang sesuai dengan kebutuhan peralatan proteksi dan kontrol.

Karena arus yang mengalir melalui seluruh sel bersifat sama, kondisi setiap sel sangat menentukan kinerja keseluruhan rangkaian baterai. Jika salah satu sel mengalami penurunan kapasitas atau gangguan, maka kinerja seluruh rangkaian akan terpengaruh. Oleh sebab itu, pemantauan kondisi setiap sel dan keseragaman karakteristik baterai sangat penting untuk menjaga keandalan sistem baterai yang dihubungkan secara seri.

Adapun kelemahan dan kelebihan rangkaian seri yaitu :

1. Kelebihan rangkaian seri
  - a. Rangkaian listrik yang disusun secara seri akan membutuhkan jumlah kabel penghantar yang lebih sedikit dibandingkan dengan rangkaian listrik yang disusun secara paralel.
  - b. Karena jumlah kabel yang digunakan lebih sedikit sehingga biaya yang digunakan untuk membuat rangkaian seri ini akan lebih murah dibandingkan dengan rangkaian paralel.
  - c. Apabila beban listrik yang disusun secara seri maka arus yang mengalir pada tiap-tiap beban akan sama besar walaupun tahanan masing-masing beban listrik tidak sama besar.
  - d. Apabila sumber tenaga listrik yang dirangkai secara seri maka tegangan total yang dihasilkan oleh masing-masing sumber tenaga listrik tersebut merupakan hasil penjumlahan dari masing-masing tegangan pada sumber tenaga listrik. Misalnya, dua buah baterai dengan tegangan 12 volt dan arus 30 ampere disusun secara seri maka tegangan total rangkaian baterai

tersebut adalah 24 volt sedangkan arus total yang dikeluarkan rangkaian baterai tersebut tetap sama yaitu 30 ampere.

## 2. Kekurangan rangkaian seri

- a. Apabila beban listrik dirangkai secara seri, misalnya beban listrik tersebut adalah lampu, maka apabila ada salah satu lampu putus akan membuat lampu yang lain juga ikut padam.
- b. Lampu-lampu yang dirangkai secara seri, lampu-lampu tersebut tidak akan menyala sama terang.

Sedangkan dalam sistem baterai dipasang pada rangkaian paralel rangkaian yang disusun secara berderet disebut rangkaian paralel. Pada rangkaian paralel, tegangan yang melewati tiap komponen adalah sama, dan total arus adalah jumlahan arus yang melewati tiap komponen. Rangkaian listrik paralel adalah suatu rangkaian listrik, di mana semua input komponen berasal dari sumber yang sama. Semua komponen satu sama lain tersusun paralel. Hal inilah yang menyebabkan susunan paralel dalam rangkaian listrik menghabiskan biaya yang lebih banyak (kabel penghubung yang diperlukan lebih banyak). Selain kelemahan tersebut, susunan paralel memiliki kelebihan tertentu dibandingkan susunan seri. Adapun kelebihanannya adalah jika salah satu komponen dicabut atau rusak, maka komponen yang lain tetap berfungsi sebagaimana mestinya.

Didapat kelemahan dan kelebihan rangkaian paralel yaitu :

### 1. Kelebihan Rangkaian Paralel

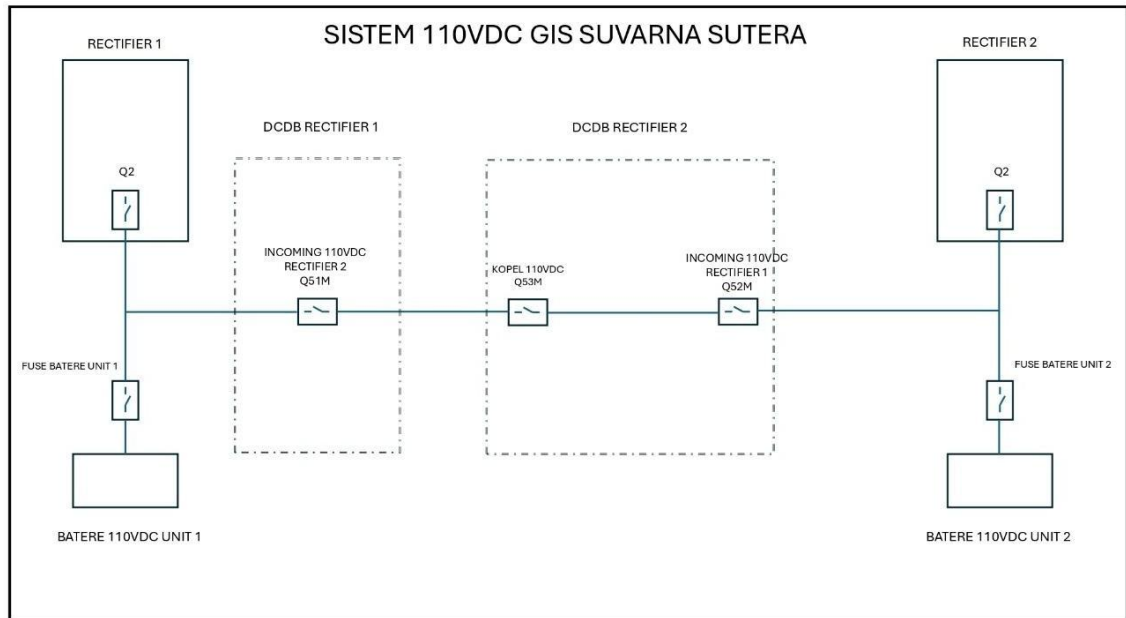
- a. Apabila sumber tenaga listrik atau contohnya baterai yang disusun secara paralel maka kapasitas arus pada rangkaian baterai tersebut akan meningkat. Kapasitas arus total yang dihasilkan pada rangkaian baterai tersebut sama dengan penjumlahan dari masing-masing arus yang tersimpan di dalam masing-masing baterai. Misalnya ada dua buah baterai yang masing-masing memiliki tegangan total 12 Volt dan jumlah arus 35 Ampere. Maka jumlah arus total yang dapat dikeluarkan rangkaian paralel baterai tersebut adalah 70 Ampere.
- b. Jika beban listrik misalnya lampu di rangkai secara paralel maka apabila salah satu lampu putus, lampu yang lain akan tetap menyala.

- c. Jika beban listrik dirangkai secara paralel maka tegangan listrik yang menuju ke masing-masing beban adalah sama besar dengan tegangan sumber sehingga apabila beberapa lampu dengan daya yang sama dirangkai secara paralel terhadap sumber tegangan maka lampu-lampu tersebut akan menyala sama terang.

## 2. Kekurangan Rangkaian Paralel

- a. Apabila beban listrik yang disusun secara paralel memiliki tahanan yang berbeda maka arus listrik yang mengalir ke masing-masing beban kelistrikan menjadi tidak sama besar.
- b. Rangkaian listrik yang disusun secara paralel akan membutuhkan jumlah kabel penghantar yang lebih banyak dibandingkan rangkaian listrik yang disusun secara seri.
- c. Karena jumlah kabel penghantar yang digunakan lebih banyak maka untuk biaya pembuatan akan lebih mahal dibandingkan dengan rangkaian seri.

### 2.2.7 Gambaran Umum Sistem 110 V DC



**Gambar 2.11** Single Line Diagram Sistem 110 V DC

**Gambar 2.11** tersebut menunjukkan diagram satu garis (*Single Line Diagram*) sistem suplai 110 C DC di GIS Suvarna Sutura. Gambar ini menggambarkan konfigurasi sistem 110 V DC yang terdiri dari dua unit *rectifier* dan dua unit baterai sebagai sumber suplai utama dan cadangan, *Rectifier 1* dan *Rectifier 2* berfungsi mengubah sumber arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) untuk menyuplai beban DC sekaligus mengisi baterai. Masing-masing *rectifier* terhubung ke rel DC melalui peralatan pengaman dan pemutus, seperti pemutus sirkuit (Q2) dan rangkaian DCCB (*Direct Current Distribution Board*) [21].

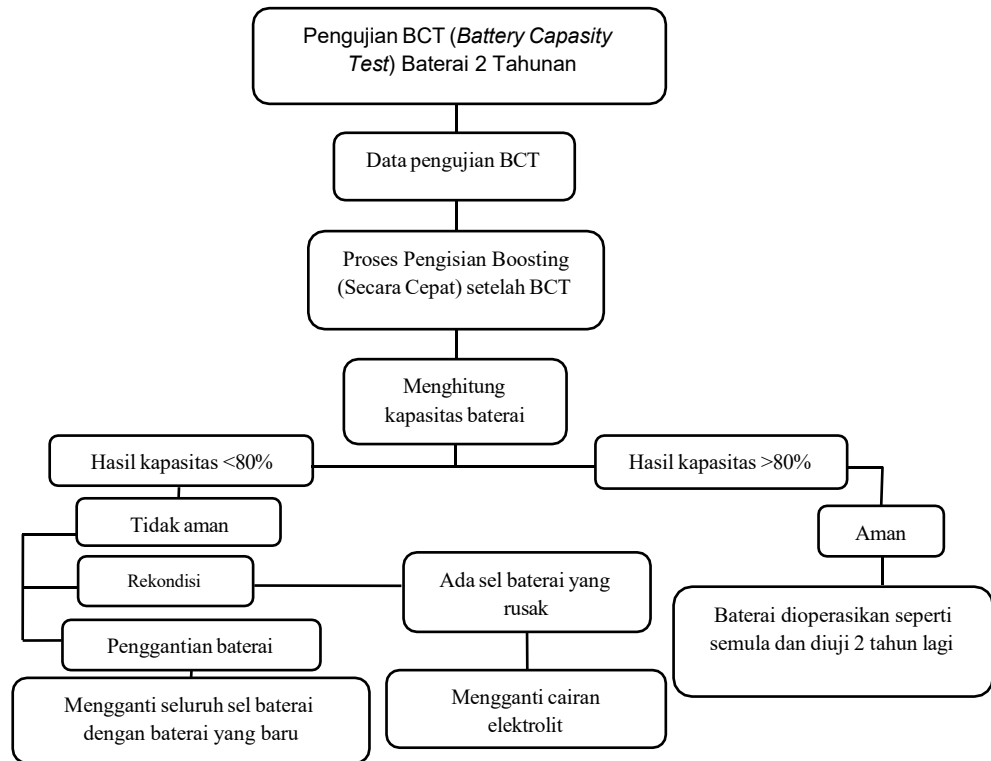
Pada sisi baterai, terdapat Baterai 110 V DC Unit 1 dan Baterai 110 V DC Unit 2 yang masing-masing dilengkapi dengan *fuse* sebagai pengaman. Kedua baterai ini berfungsi sebagai sumber cadangan apabila suplai dari *rectifier* terganggu atau terjadi kehilangan tegangan dari sumber utama. Rel 110 V DC menjadi titik penghubung antara *rectifier*, baterai, dan beban. Melalui pengaturan *incoming rectifier* dan kopel (*coupler*) 110 V DC, sistem dapat dioperasikan secara fleksibel, baik menggunakan satu sumber, dua sumber secara paralel, maupun dengan memindahkan beban dari satu unit baterai ke unit baterai lainnya saat dilakukan pemeliharaan [22].



Sistem 110 V DC di GIS Suvarna Sutra menjadi objek penting dalam penelitian ini karena baterai yang digunakan telah beroperasi selama beberapa tahun. Dengan usia tersebut, terdapat kemungkinan terjadinya penurunan kapasitas. Melalui pengujian kapasitas baterai menggunakan *Battery Capacity Test* (BCT), dapat diketahui kondisi actual baterai apakah masih layak beroperasi atau sudah memerlukan tindakan perbaikan maupun penggantian. Hasil pengujian ini akan menjadi dasar evaluasi terhadap keandalan sistem 110 V DC secara keseluruhan [23].

Dengan demikian, analisis sistem 110 V DC ini menunjukkan bahwa baterai memegang peranan kunci dalam menjaga kontinuitas operasi gardu induk, sehingga pemeliharaan dan pengujian kapasitas secara berkala merupakan kebutuhan mutlak untuk menjamin keandalan sistem. Konfigurasi ini dirancang untuk menjamin kontinuitas suplai 110 V DC sehingga sistem proteksi, kontrol, dan peralatan penting di gardu induk tetap dapat beroperasi secara andal meskipun terjadi gangguan pada salah satu sumber.

### 2.3 Kerangka Pemikiran



**Gambar 2.12** Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran pada penelitian ini disusun menggambarkan alur analisis yang sistematis dalam mengevaluasi kinerja baterai pada sistem 110 V DC melalui metode *Battery Capacity Test* (BCT). Alur ini menunjukkan hubungan yang jelas antara proses pengujian, analisis hasil, serta pengambilan keputusan teknis terkait kelayakan operasi baterai dalam mendukung sistem proteksi dan kontrol di gardu induk.

Tahap awal dalam kerangka pemikiran ini adalah pelaksanaan pengujian BCT yang dilakukan secara berkala setiap dua tahun sekali. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data aktual mengenai kondisi dan kapasitas baterai berdasarkan kemampuan aktual baterai dalam menyuplai arus sesuai dengan durasi dan beban yang diperlukan. Data uji BCT menjadi dasar utama dalam proses evaluasi, karena mencerminkan tingkat degradasi kapasitas baterai akibat penuaan, kondisi operasional, dan pola pemeliharaan yang telah dilakukan.

Setelah pengujian BCT selesai, (*boost charging*) dilakukan sebagai langkah pemulihan awal untuk mengembalikan baterai ke kondisi siap beroperasi. Proses ini penting untuk memastikan baterai tidak berada dalam kondisi *deep discharge*, yang dapat mempercepat penurunan umur pakai. Selanjutnya, data hasil pengujian dianalisis dengan menghitung kapasitas baterai untuk menentukan persentase kapasitas aktual terhadap kapasitas nominal baterai.

Hasil perhitungan kapasitas baterai kemudian digunakan sebagai parameter utama dalam pengambilan keputusan. Jika kapasitas baterai di bawah 80%, maka kondisi tersebut dikategorikan sebagai tidak aman. Baterai dengan kapasitas di bawah ambang batas ini dinilai tidak lagi dapat diandalkan dalam menyediakan sistem perlindungan dan kontrol, sehingga berpotensi mengurangi keandalan operasi gardu induk. Dalam kondisi ini, diperlukan tindakan korektif berupa rekondisi baterai, penggantian cairan elektrolit pada sel yang mengalami penurunan kinerja atau performa, atau penggantian sebagian atau seluruh baterai, tergantung pada tingkat kerusakan yang teridentifikasi.

Sebaliknya, apabila hasil pengujian menunjukkan kapasitas baterai di atas 80%, maka baterai dinyatakan dalam kondisi aman dan layak untuk digunakan kembali. Dalam kondisi ini, baterai tetap digunakan untuk mendukung sistem 110 V DC, dengan tetap menerapkan pemeliharaan preventif dan melakukan uji ulang sesuai periode yang ditentukan, yaitu setiap dua tahun.

Berdasarkan alur ini, kerangka pemikiran ini menekankan bahwa metode BCT tidak hanya berfungsi sebagai alat untuk mengevaluasi kapasitas baterai, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan teknis dalam menentukan strategi pemeliharaan, rekondisi, dan penggantian baterai. Dengan penerapan kerangka pemikiran ini, diharapkan keandalan sistem baterai 110 V DC dapat terjaga secara berkelanjutan sehingga dapat mendukung secara optimal operasi sistem perlindungan dan pengendalian.